



IFSTTAR




Facteurs d'endommagement des chaussées :

- Mécanismes pris en compte dans les méthodes de dimensionnement
- Autres modes d'endommagement : observations et mécanismes

Jean-Maurice Balay
Jean-Michel Piau

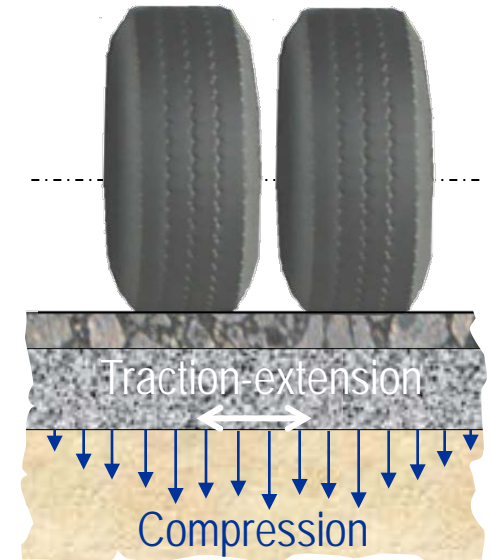
IFSTTAR

Sommaire

- 
- 1- Les mécanismes d'endommagement pris en compte dans les méthodes de dimensionnement
 - Les bases du dimensionnement rationnel des chaussées
 - Besoins d'adaptation et solutions apportées
 - 2- Autres modes d'endommagement : observations et mécanismes
 - Dégradations hivernales
 - Comportement des interfaces
 - 3- Conclusions

Les 3 mécanismes d'endommagement pris en compte explicitement

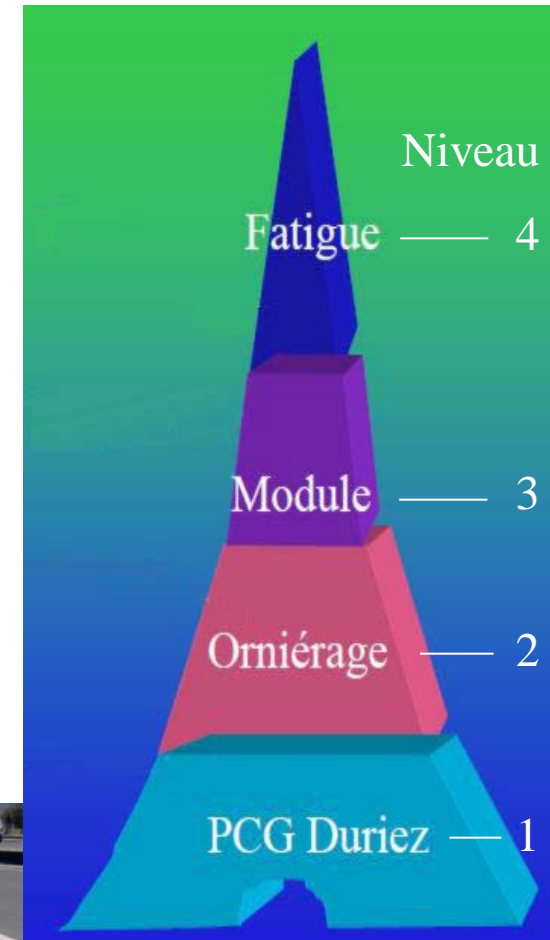
- Fissuration par fatigue en flexion-traction des couches d'assise traitées
- Déformations permanentes des sols et matériaux non traités par plastification
- Chute de portance des sols support sensibles au gel en période de dégel



Autres mécanismes de dégradation ...

...pris en compte à travers la formulation des matériaux. Entre autre :

- Tenue à l'eau : Duriez
- Vieillissement du bitume : Rtfot
- Fissuration thermique: Fraas
- Orniérage des couches de surface bitumineuses par fluage thermo-plastique
- ...



Autres mécanismes de fonctionnement ...

...pris en compte implicitement à travers les règles de conception, les choix des paramètres de calcul et le calage semi-empirique du modèle. En outre :

- Comportement thermo-viscoélastique des enrobés bitumineux : calculs élastiques linéaires à la température "équivalente" 15°C , fréquence 10Hz
- Comportement des interfaces : "Collé – Semi-collé – Glissant"
- Effets de bord : surlargeurs des chaussées rigides
- Renforcement : pseudo modules résiduels des matériaux dégradés



Exemple : pseudo modules des matériaux dégradés

Guide technique "Les renforcements de chaussées" (à paraître, 2012) :

Détermination des modules des matériaux bitumineux :

- En fonction (en outre) de la qualité de la carotte et des parois du trou de carottage,
- Pour la modélisation et le calcul "Alizé" de la structure en place et de son renforcement.



		Qualité de la carotte				
		Saine	Médiocre	Fissurée	Fragmentée	Désagrégée
Qualité des parois du trou de carottage	Lisses	E_{ref}	$70\%E_{ref}$	2000 MPa	Non rencontré	Non rencontré
	Granulats arrachés	Non rencontré	$70\% E_{ref}$	2000 MPa	1000 MPa	500 MPa

E_{ref} : module du matériau "sain"

Besoins d'adaptation

Quelques exemples :

- Agressivité des charges routières et chargements spéciaux (chemins de sollicitations complexes)
- Canalisation du trafic (urbain, tramway)
- Chaussées aéronautiques
- Autres contextes climatiques (outre mer et export) : autres températures équivalentes
- ...



Besoins d'adaptation : solutions apportées

- Méthodologie générale : transposition du modèle routier
 - Formalisme routier et critères d'endommagement conservés
- Passage aux EF-3D avec possibilités de couplage
 - Structures Tramways et ferroviaires : mécanique (poids propre et essieux tramway) + thermique (gradient vertical de températures) + déformée initiale
- Loi d'endommagement
 - Intégration tensorielle continue selon les trajectoires
 - Prise en compte explicite du balayage transversal
 - Extension du postulat de cumul de dommages (Miner)
 - Développement en cours d'un modèle de fatigue multi-linéaire, sur la base d'essais de fatigue en laboratoire



Besoins d'adaptation : solutions apportées

- Mise en application. Entre autre :
 - Aéronautique : Guide dimensionnement rationnel (à paraître, 2013)
 - Voie Tramway : consensus général (MO, ingénieries, industriels)
- Exemples présentés
 - Modèle d'endommagement multilinéaire
 - Extension au dimensionnement des voies Tramways
 - Extension à l'aéronautique

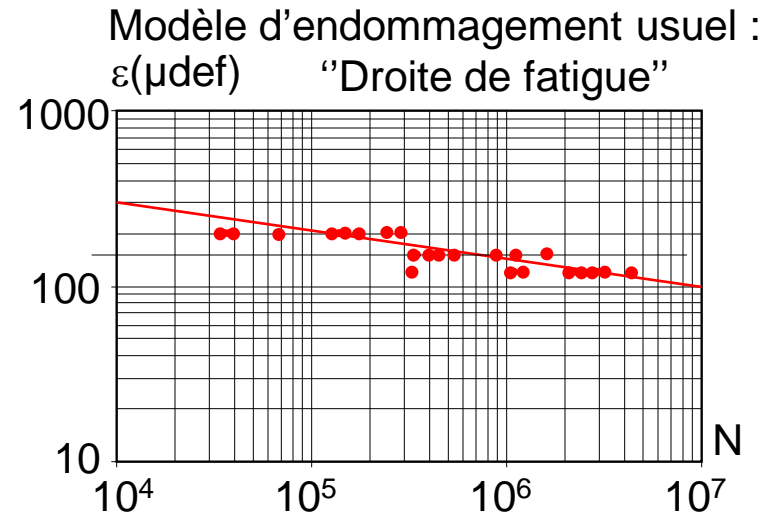
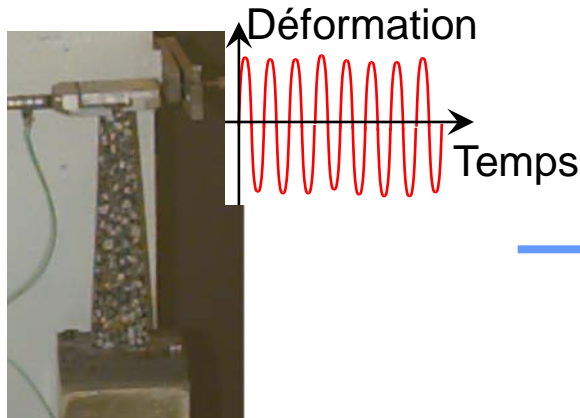




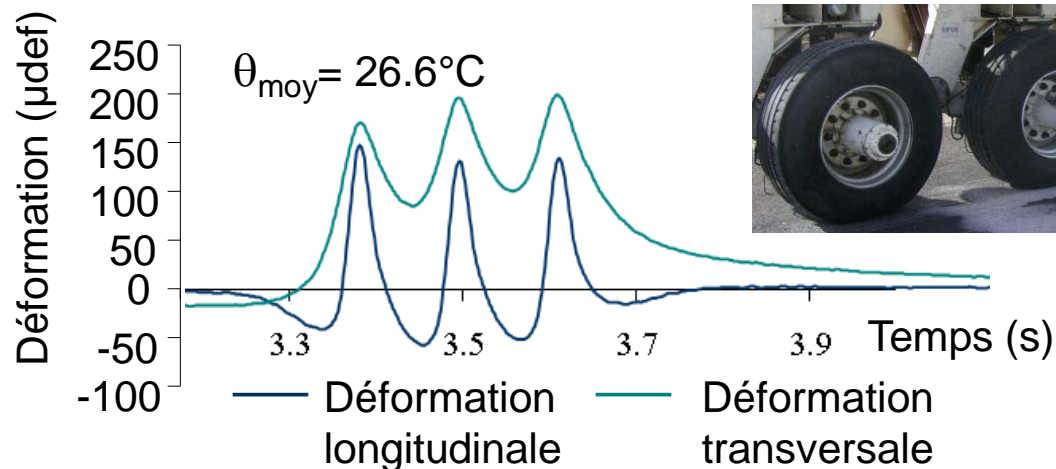
Besoins d'adaptation : l'endommagement "multiplics"

Le problème posé :

Essai de fatigue en laboratoire



Sollicitation dans la chaussée : exemple essieu Tridem



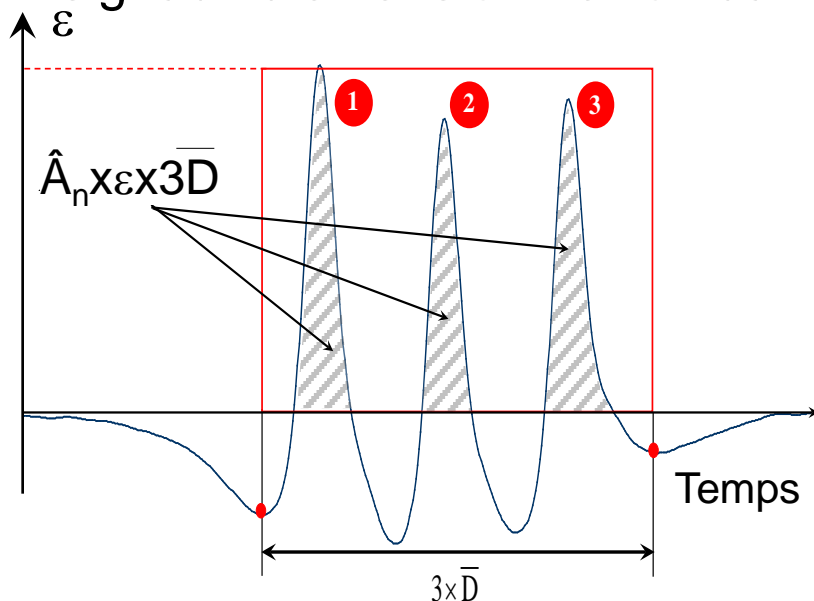


Besoins d'adaptation : l'endommagement "multiplics"

Développement d'un modèle de fatigue Multiplic :
thèse Farah Homsy (Ifsttar, I2M U.Bordeaux, Spiga
U.Nantes) déc. 2011

Analyse statistique en composantes principales de la base de données Manège de fatigue Ifsttar + campagne préalable d'essais de fatigue labo

→ détermination des paramètres de forme caractérisant les signaux d'extension-flexion dans les structures bitumineuses.

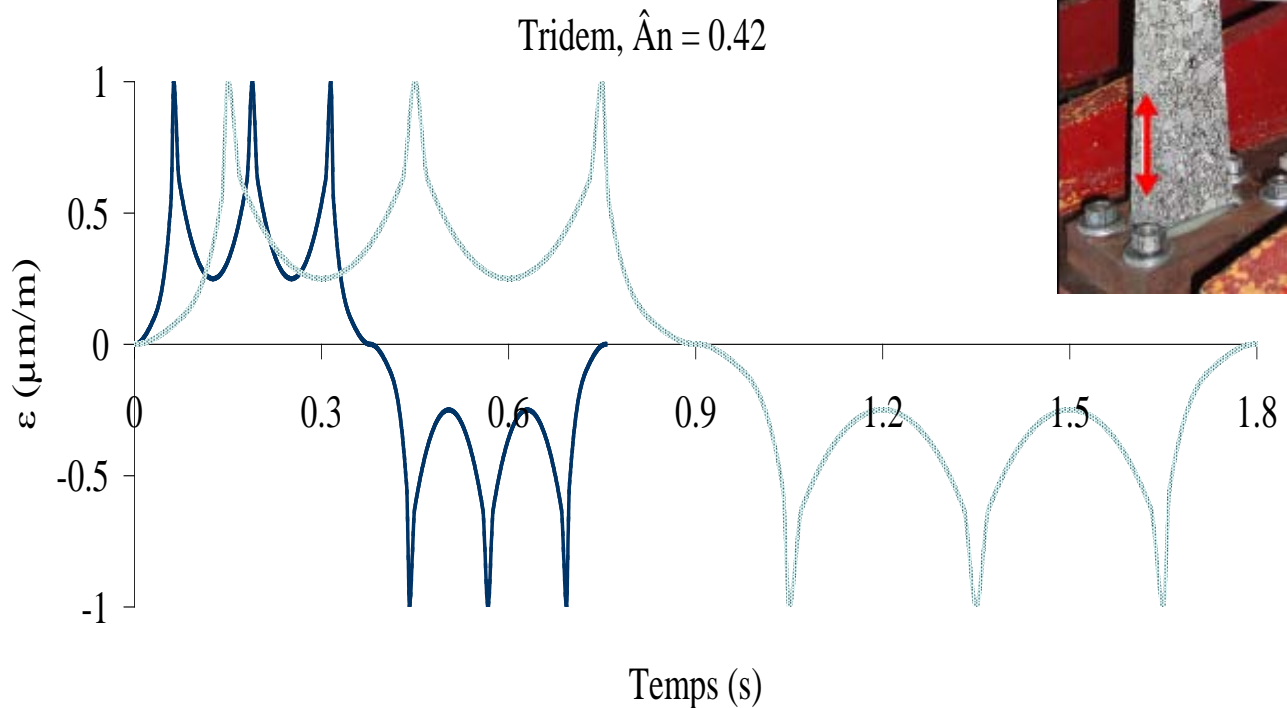


- 4 paramètres indépendants:
- ε : Niveau de déformation
 - N_p : Nombre de pics
 - \hat{A}_n : Taux de remplissage du signal
 - \bar{D} : Durée du signal divisée par nbre de pics



Besoins d'adaptation : l'endommagement "multipics"

Essais de fatigue "Multipics" en
laboratoire (LR Bordeaux)

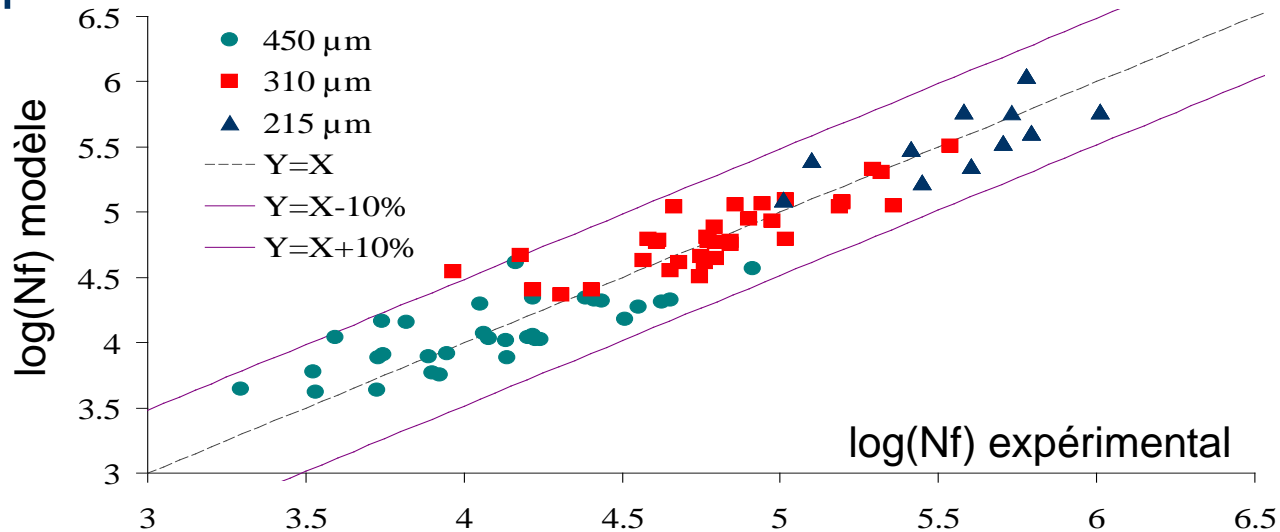


— 3 Pics, $\hat{A}_n=0,42, \bar{D}=0,105$ — 3 Pics, $\hat{A}_n=0,42, \bar{D}=0,25$

Besoins d'adaptation : l'endommagement "multiplics"

Essais de fatigue "Multiplic" en laboratoire (LR Bordeaux)
→ modèle de fatigue multilinéaire :

$$\log(N_f) = a \log \varepsilon + b \log(N_p) + c \hat{A}n + d D + e \quad \text{avec} \\ R=0.91$$

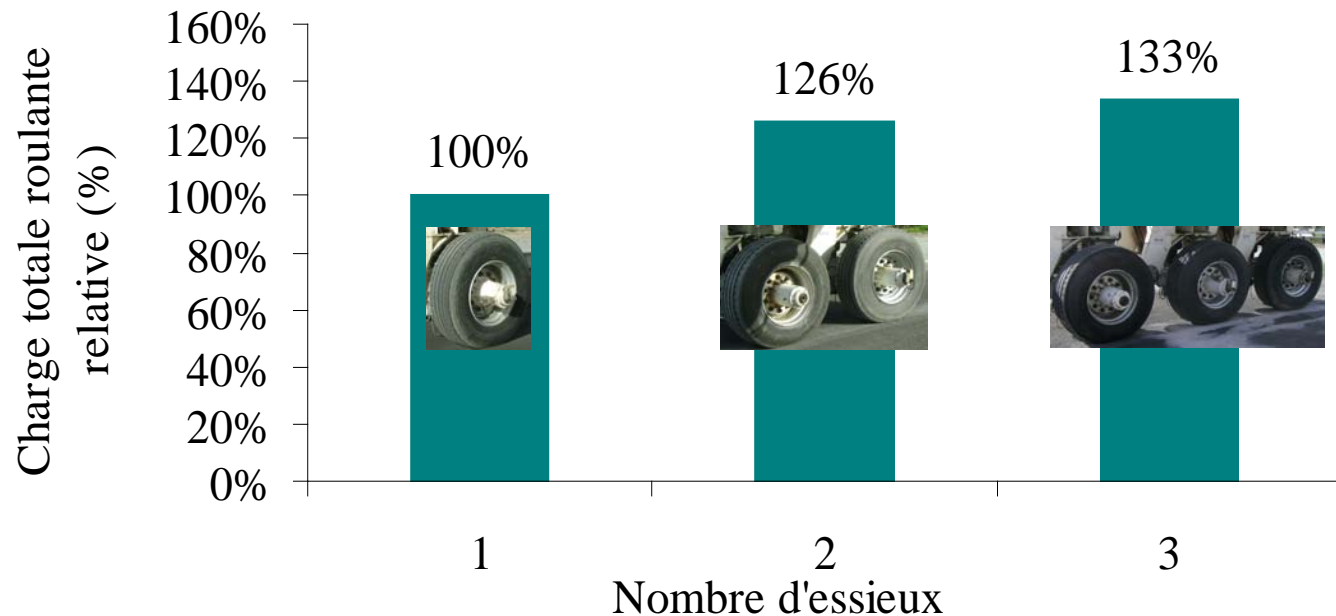


→ Les 4 paramètres indépendants exercent un effet significatif sur la fatigue, alors que ε est le paramètre unique du modèle actuel.

Nota : modèle établi pour une GB3 de référence, température 20°C

Besoins d'adaptation : l'endommagement "multiplics"

Première application : effet du nombre d'essieux, même charge à la roue (32,5 kN), configurations roulant à la vitesse de 70 km/h sur structure bitumineuse épaisse



→ A même endommagement, les configurations d'essieux multiples permettent de transporter plus de charge que les configurations d'essieux simples.



Les chaussées pour Tramways sur rails : contexte

Retour d'expérience actuel sur le dimensionnement des voies Tramways :

- Dimensionnement historique inspiré de règles SNCF (structures sur ballast)
- Développement de la structure TFS "tout béton" → transposition du modèle routier (Alizé) avec Sémaly et Ratp : modèle peu adapté (cf. 3D)
- Bilan plus de 25 ans (Nantes, Grenoble) : structure standard TFS jugée \pm surdimensionnée
- Principal mode de dégradation : les revêtements et les interfaces entre voie Tramway et voirie urbaine.

→ besoin d'optimisation ressentie par la DDT, les AOT et les constructeurs. Besoin renforcé par le développement de nouveaux types de structures (pose continue, voie verte ...)

Les chaussées pour Tramways sur rails : spécificités

- Circulation des charges roulantes sur des rails →
 - Canalisation totale du trafic
 - Distances aux bords longitudinaux réduites
 - Chemin de contraintes particulier
 - Pas de circulation sur les joints transversaux entre dalles
 - Effets thermiques faibles en présence de revêtements sur la hauteur du rail. Pas dans le cas de pose continue dans engravure
 - Coefficients de discontinuité K_d routier non directement utilisables
 - Effets dynamiques spécifiques au matériel roulant
- Configurations des charges relativement bien connues (géométrie, poids) →
 - Pas de recours au concept d'agressivité : Intégration explicite des histogrammes de chargement.



Les chaussées pour Tramways sur rails : modèle de calcul adopté

- Calcul mécanique des sollicitations dans les bétons: MEF-3D
- Valeurs admissibles (fatigue) : modèle routier LCPC-SETRA (effets de discontinuité reproduits par le modèle EF-3D → $K_d=1$)
- Prise en compte explicite des histogrammes de charges sur essieux (loi d'additivité de Miner)
- Correction pour canalisation totale du trafic (Miner)
- Coefficient de majoration dynamique (1.30 à 1.50) : Cf . Mesures CTS-SEMALY-LR Strasbourg et préconisations SNCF

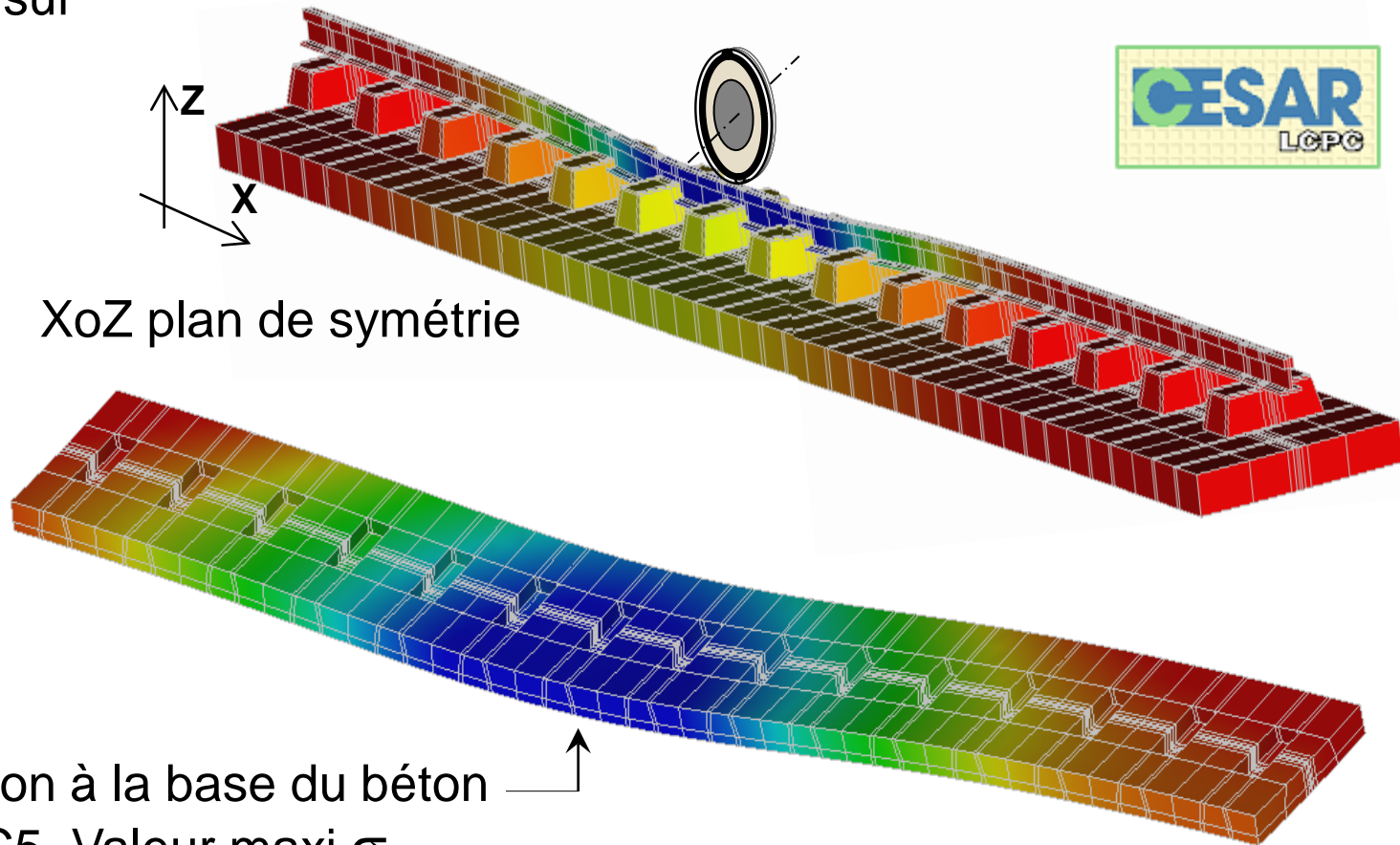
Aujourd'hui :

Modèle de dimensionnement "Tramway" largement adopté en France (ingénieries, constructeurs de matériels roulants, entreprises ...)

Mais : pas de cadre "institutionnel", pas d'entité fédératrice → réelle difficulté pour développer dans le domaine Tramway une doctrine de dimensionnement à caractère "officiel".

Les chaussées pour Tramways sur rails : modèle EF-3D

Exemple de modèle EF-3D, progiciel César-Lcpc).
Le béton de fondation et le massif support ne sont pas représentés sur ces 2 figures.



XoZ plan de symétrie

Traction-flexion à la base du béton de calage BC5. Valeur maxi σ_{tmax}

Critère de dimensionnement : $\sigma_{tmax} \leq \sigma_{tadmissible} \times K_{canal.} \times K_{dyn}$

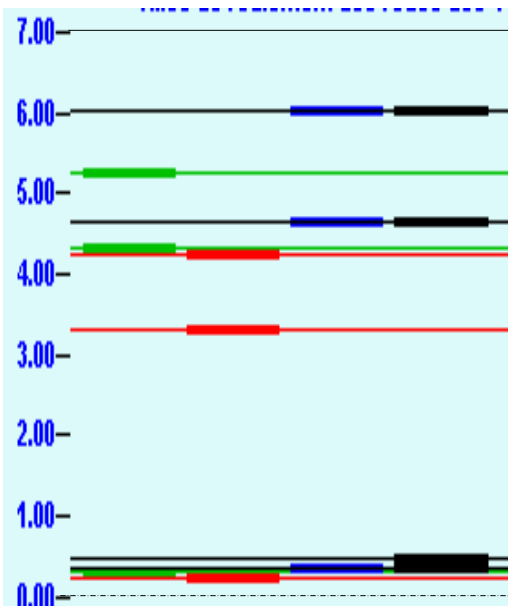


Les chaussées aéronautiques : vers une méthode rationnelle

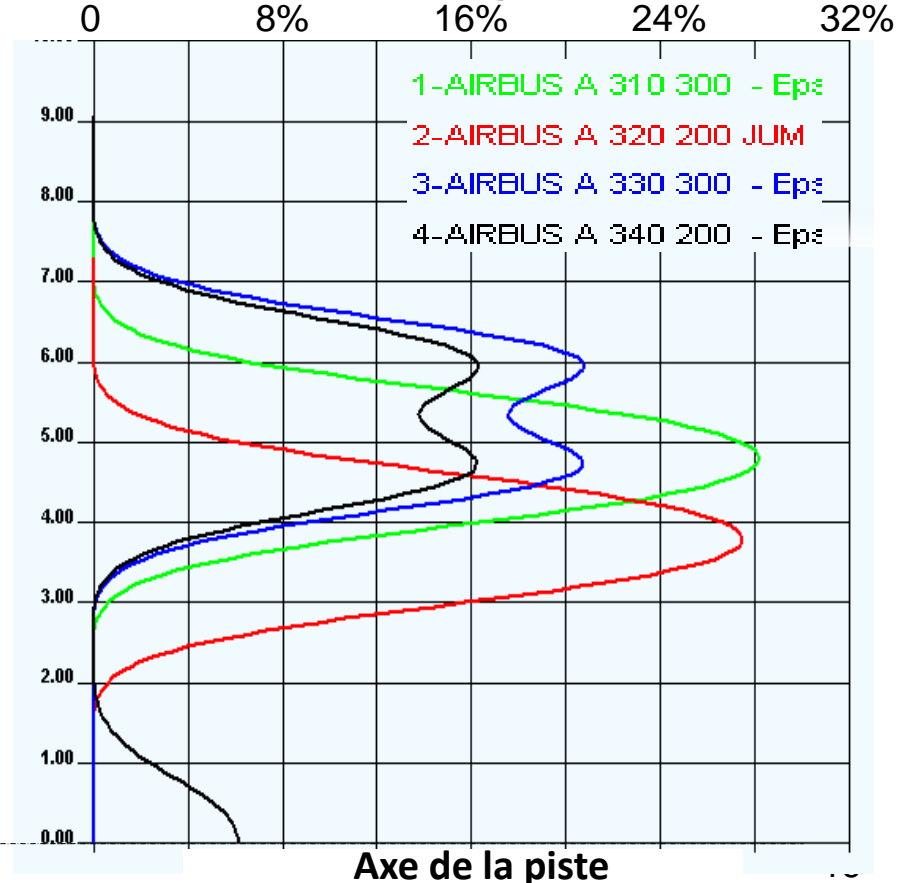
- Futur Guide DGAC-STAC : "Dimensionnement rationnel des chaussées aéronautiques souples" (à paraître 2013)
- Logiciel d'application : Alizé-Aéronautique

épais (m)	Young (MPa)	Nu	Type de matériau
0.06	f(T,F)	0.350	bb
0.20	f(T,F)	0.350	gb3
0.126	600	0.350	gnt1
0.25	240	0.350	gnt1
infini	80	0.350	plateforme

Bandes de roulement avions



Dommage



Autres modes d'endommagement : observations et mécanismes

- Les outils existants permettent de se prémunir des principaux modes de dégradation
- Mais il existe d'assez nombreux autres mécanismes encore mal identifiés à considérer également :
 - Pour une meilleure approche globale du fonctionnement - endommagement des structures
 - Dans la conception neuve et réhabilitation (avec des contextes souvent de plus en plus complexes)
 - Dans les expertises techniques ...
- Deux sujets abordés ici :
 - Dégradations hivernales subites
 - Fonctionnement des interfaces entre couches d'EB, vu sur manège *versus* hypothèses de dimensionnement.

Dégradations hivernales subites

■ Faits

- Pelades en surface de chaussées bitumineuses, avec formation de nids de poule
- survenant en période hivernale
- **de façon subite** (parfois en quelques heures ; ex: 19/20 décembre 2009 sur routes du nord de la France)
- sur de grands linéaires (plusieurs dizaines/centaines de Km)
- en bandes de roulement VL, principalement
- sans signe précurseur spécifique (bonnes notes IQRN)
- nécessitant des fermetures et interventions parfois en urgence
- rencontrés dans divers pays (France, Angleterre, ...)

■ Questions des MO

- Causes ?
- Traitements curatifs / préventifs ?
- Détection préventive des sections à risque ?



Dégradations hivernales : facteurs, mécanisme ?

- Analyses de cas de terrain (CETE, DIR, Sociétés d'Autoroutes,...)
- Essais de laboratoire sur le comportement au gel des EB (Opérations de recherche RST: Fondephy & CCLEAR)



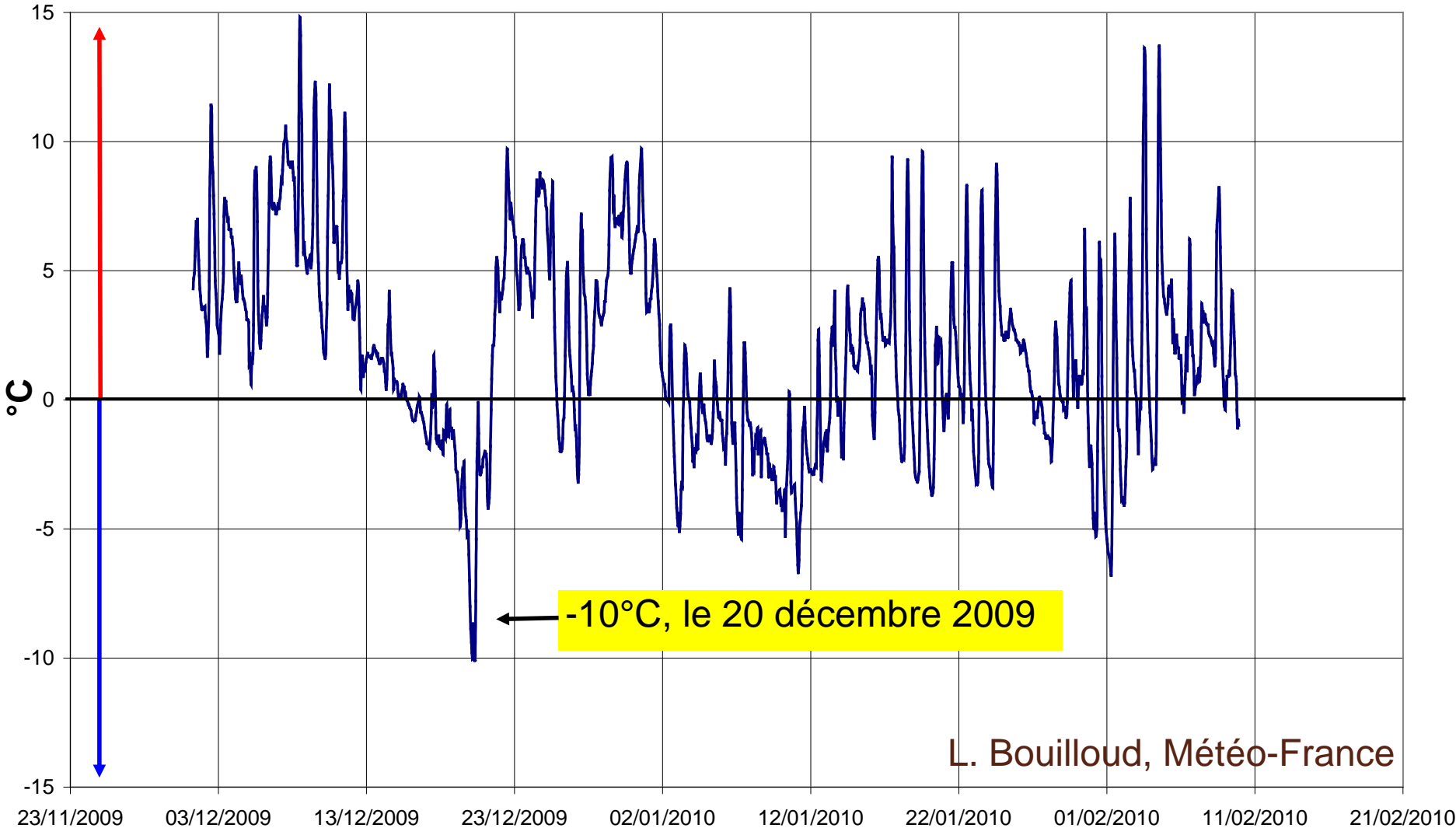
Dégradations hivernales : retours terrains et facteurs

- Les chaussées ne sont pas toutes touchées
- Vu sur chaussées dégradées :
 - décohésion de matériaux au voisinage d'interfaces, rarement dans les couches de roulement même (cf. carotte)
 - configurations diverses d'empilement de couches (matériaux bitumineux, épaisseurs)
 - assez souvent situations de rechargement
 - bétons revêtus (cf. cas précédent avec nids de poule « profonds » sur ancienne autoroute béton, rechargée par GB)
 - anciennes signalisations horizontales non fraisées
- Facteurs communs
 - **Présence d'eau dans la porosité des EB**
 - **Des températures négatives basses**
 - **avec précipitations** (cycles de gel/dégel)
 - **Un « zest » de sollicitations mécaniques (bdr)**



Température de capteur en surface de chaussée

Hiver 2009/2010, station météo-routière de Chambéry



Dates : 23 novembre 2009-->11 février 2010

L. Bouilloud, Météo-France

Dégradations hivernales : mécanisme? En première analyse :

- Unité de temps + absence de signe précurseur
 - ⇒ existence d'un mécanisme spécifique « franc » (rare en mécanique des chaussées !), différent d'un mécanisme de fatigue mécanique, thermique ou hydrique (ex: désenrobage progressif)
 - Q: mécanisme unique ou déclencheur, sur situation préalablement « dégradée » ?
- Fissuration de retrait thermique dans les EB ?
 - Non *a priori* au sens usuel du terme sur **EB sec** (mode de rupture différent; pas de fissure observée sur les essais de retrait thermique empêché jusqu'à $-15^{\circ}\text{C}/-20^{\circ}\text{C}$, même avec pentes thermiques rapides)
- Facteurs **eau+froid** ⇒ Investigations sur le comportement au gel des EB partiellement saturés d'eau

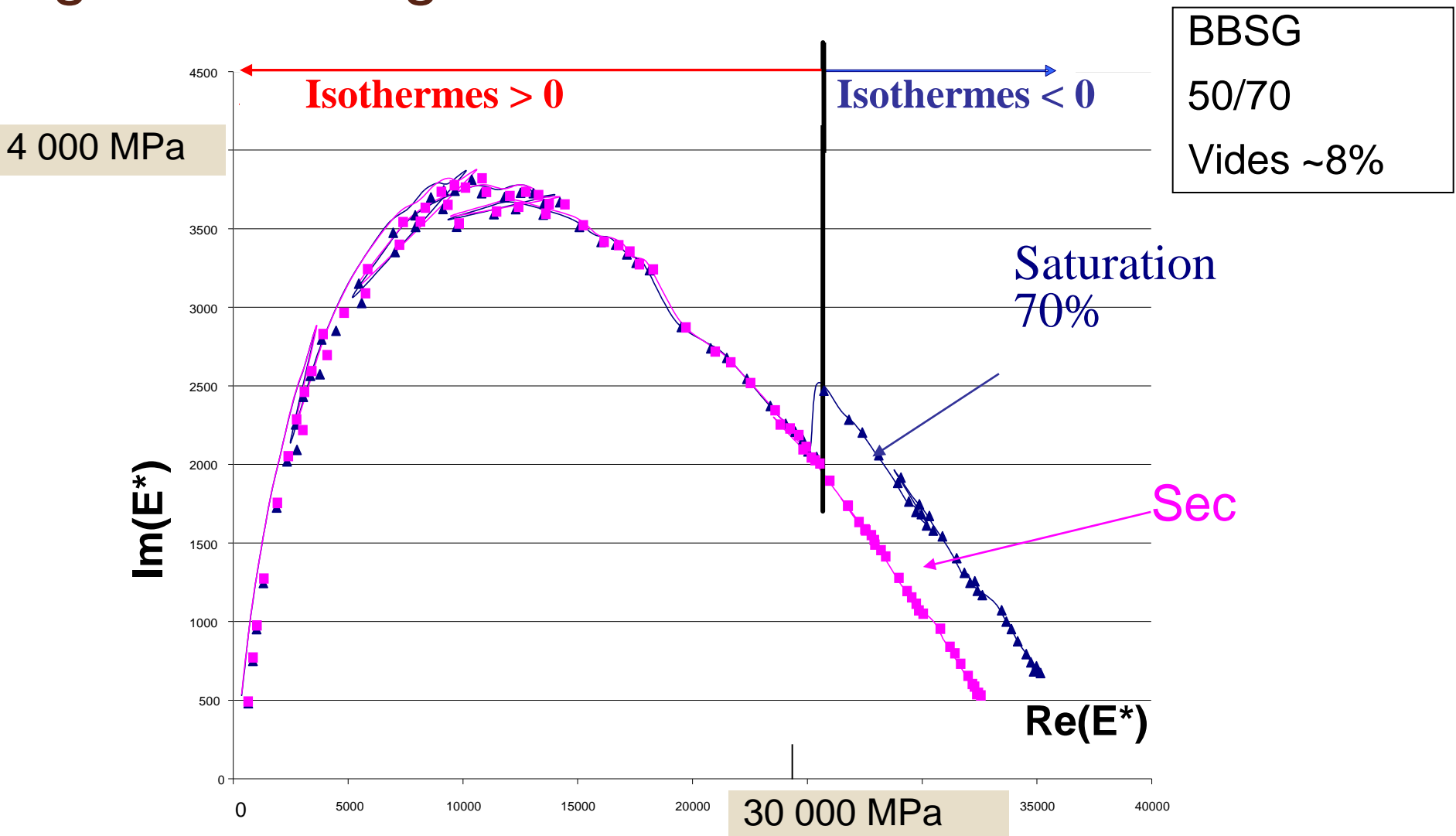


Dégradations hivernales: mécanisme ?

Essais de laboratoire

- Essais de Module Complexe sur EB partiellement saturés (IFSTTAR)
- Essais de gel/dégel sur EB, inspirés des essais de gélivité sur sols (LR Nancy/Clermont Ferrand, IFSTTAR)

Module complexe sur EB sec et partiellement saturé (70%) – Mise en évidence d'un effet significatif du gel



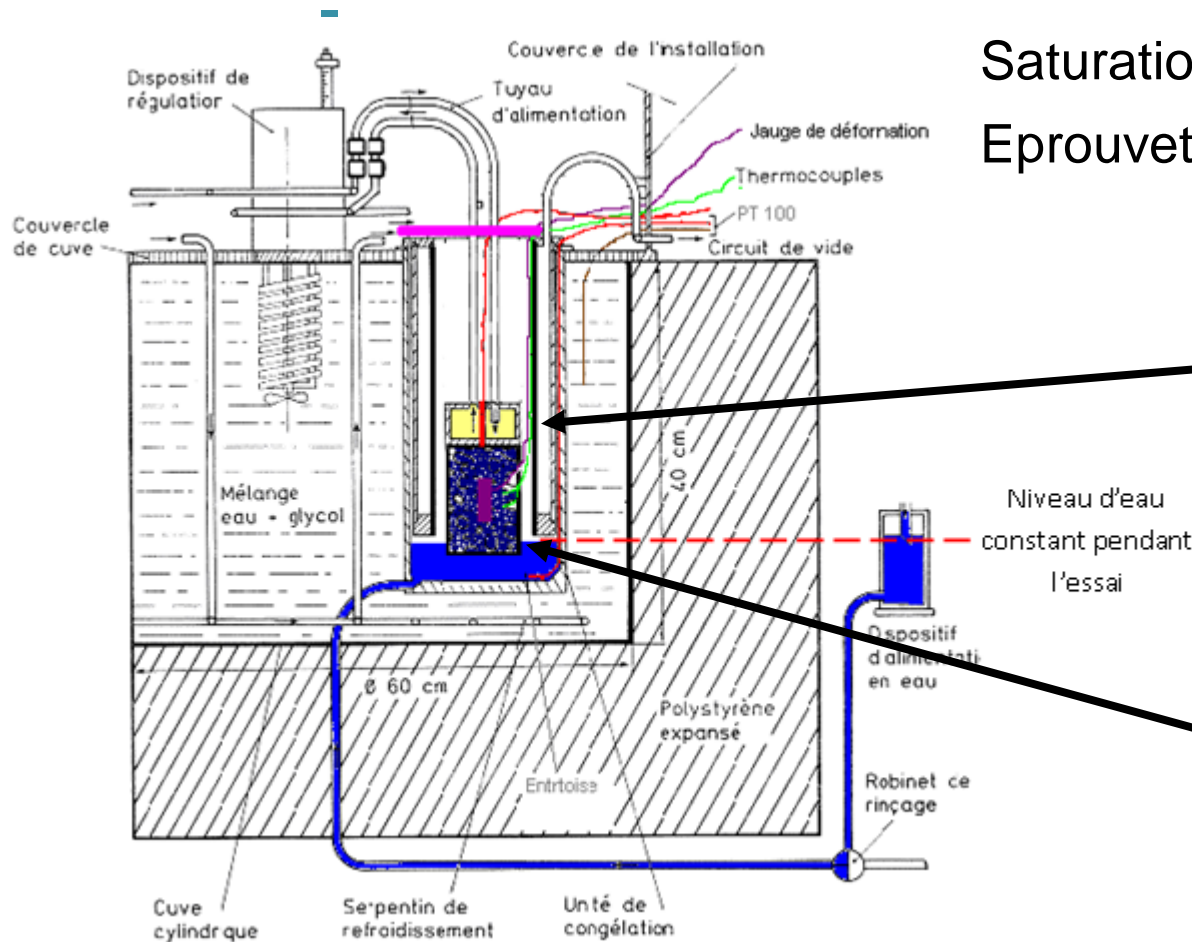
Propagation verticale de front de gel/dégel sur EB partiellement saturé

BBSG, vides 8%

Grade 35/50

Saturation eau : ~30% et 50%

Eprouvettes : H=10cm, $\Phi=8$ cm



Haut éprouvette
cycles 24h de
température entre
 $+10$ et -10°C

Bas éprouvette

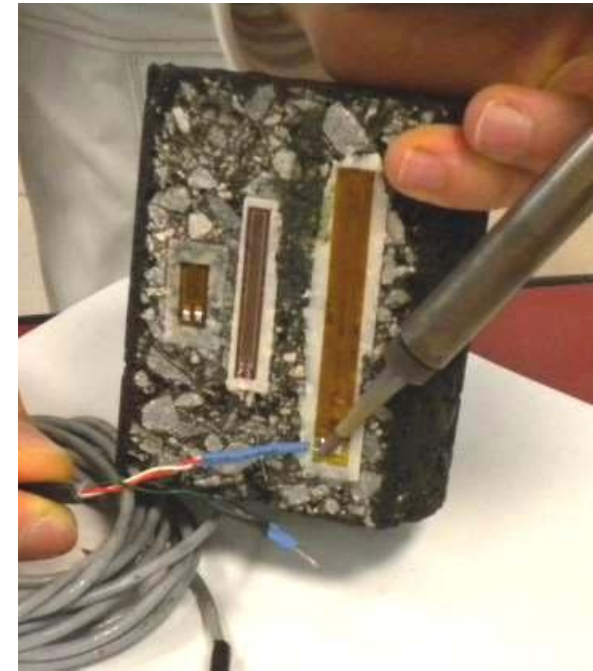
Température
constante

$+2^{\circ}\text{C}$

(avec ou sans bain)

Echantillons

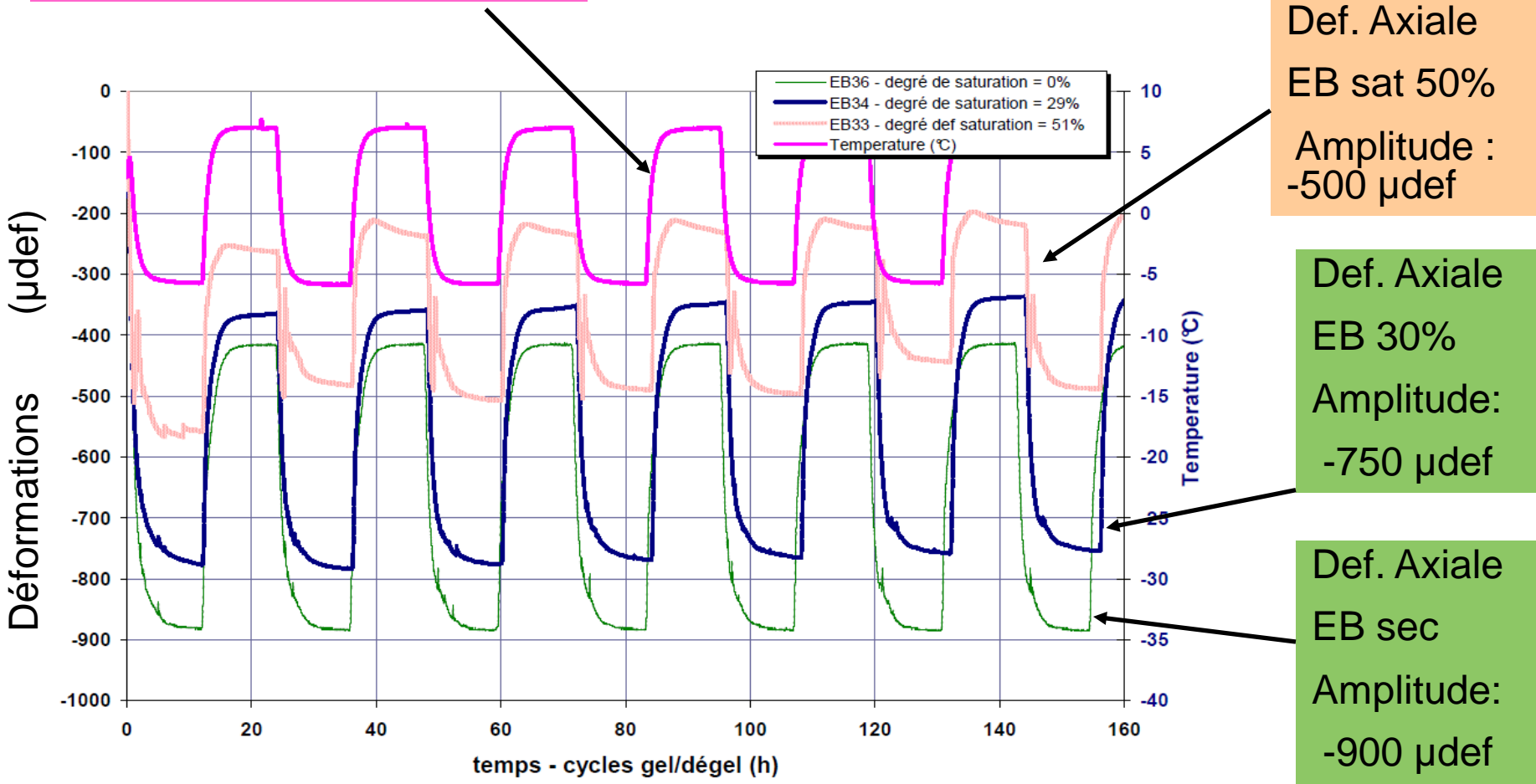
- Thermocouples
- Jauges axiales ou radiales (\parallel ou \perp direction de propagation front de gel)
- Saturation par tirage au vide: 2 lots d'éprouvettes à 30% et 50% = $f(\text{vide})$



Essais de gel sur EB

Effet global sur les déformations (axiales), au cours des cycles de gel/dégel

Température thermocouple entre +7 et -5°C

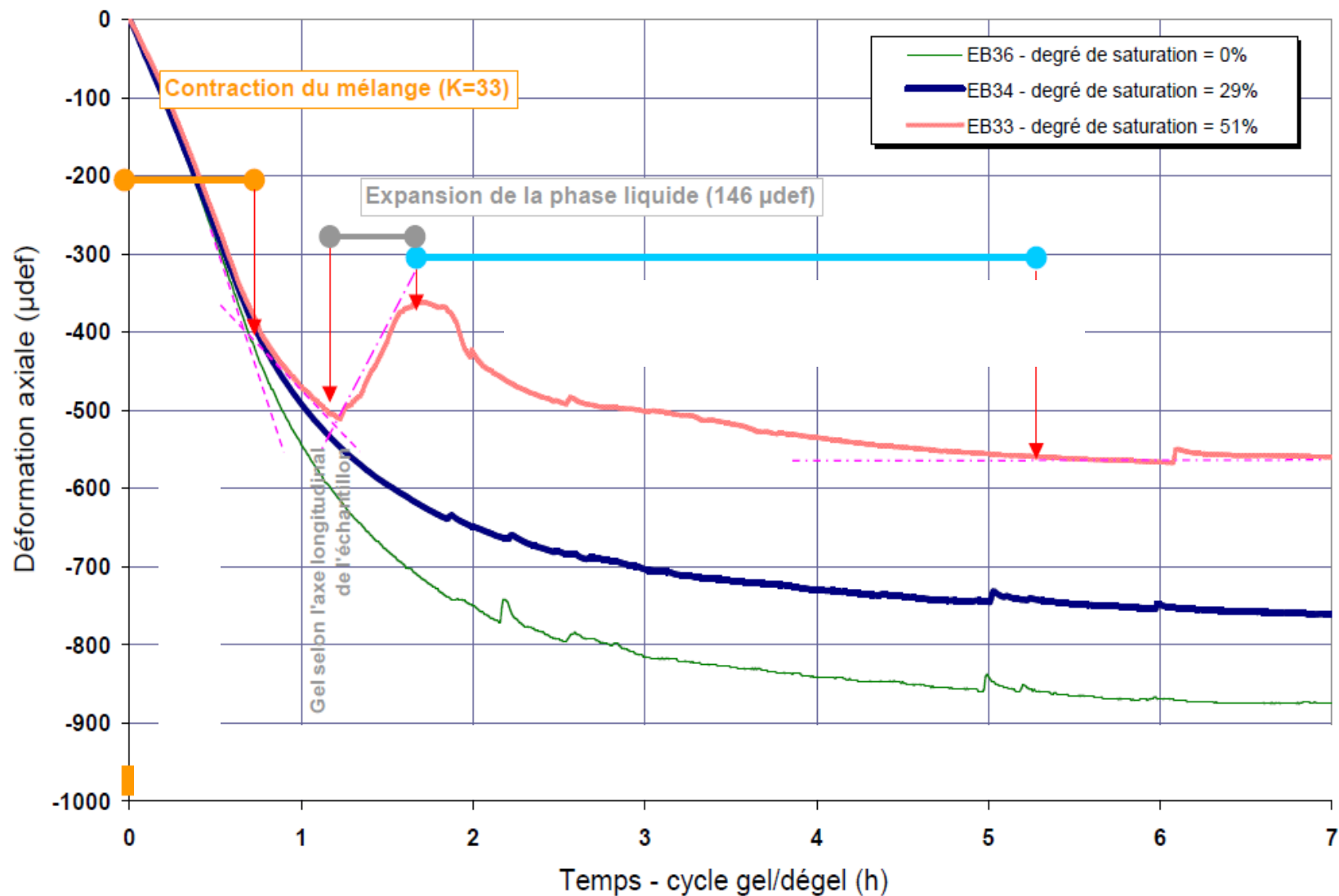


Def. Axiale
EB sat 50%
Amplitude :
-500 μdef

Def. Axiale
EB 30%
Amplitude:
-750 μdef

Def. Axiale
EB sec
Amplitude:
-900 μdef

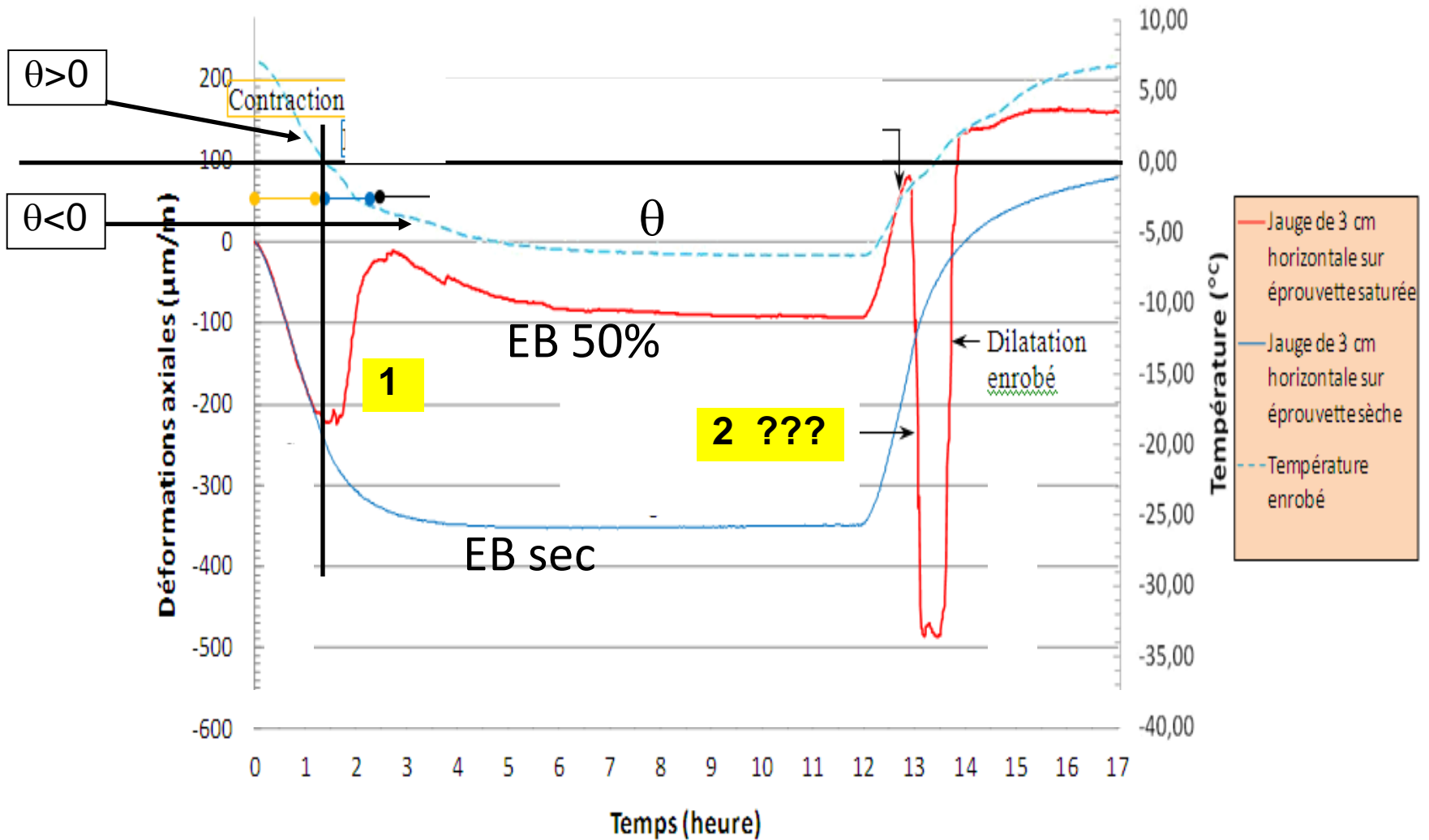
Evolution de la **déformation axiale** (moyennée sur la jauge) en cours de descente du front de gel



Evolution de la **déformation radiale** lors :

1 de la descente et

2 de la remontée du front de gel



Dégradations hivernales : premières conclusions

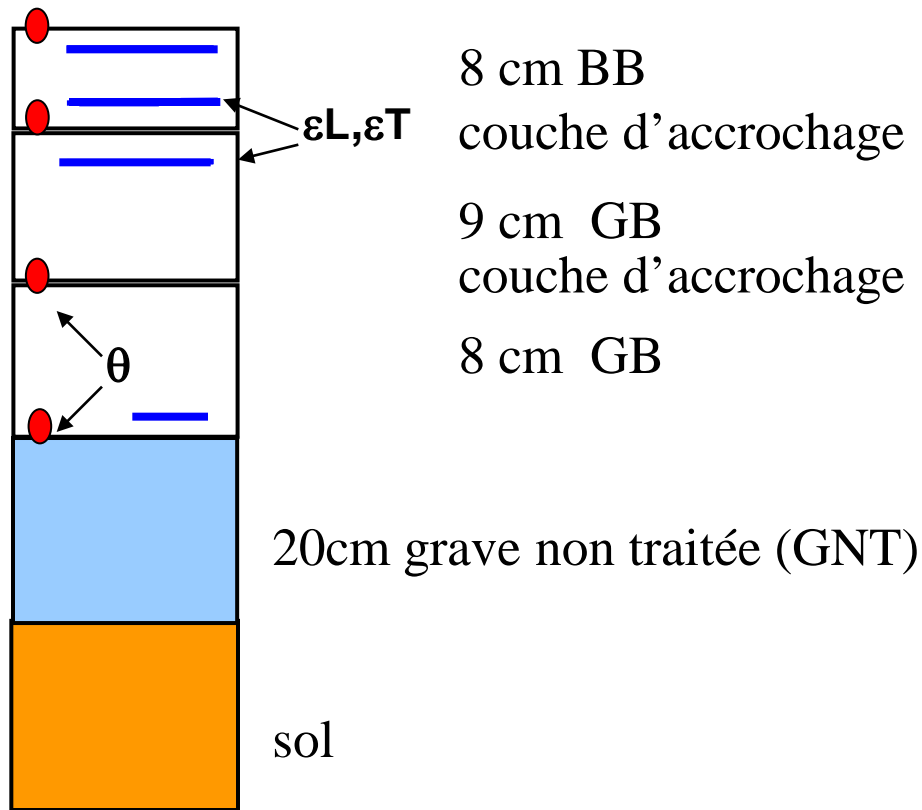
- Mécanisme potentiel = nappe « perchée » « dormante » dans les EB + réactivation au passage d'un front de gel
 - déformations significatives, à «contre courant » des déformations purement thermiques
 - possibilité de dilatations différentielles entre couches, sources de délaminage sous charges roulantes
 - travaux complémentaires prévus pour préciser l'impact du mécanisme sur les multicouches, évaluer le potentiel de cryosuccion des EB ,... (OR CCLEAR)
- Dans tous les cas, chercher à supprimer « le coupable » : l'accumulation d'eau dans les couches bitumineuses, à court ou long terme
 - Respect des règles de drainage, notamment lors des rechargements (dévers, absence de flaches, accotements ...) et entretiens périodiques des réseaux de drainage
 - Attention à la multiplication des interfaces , source de complexité non seulement mécanique, mais aussi hydrique
 - Attention aux horizons « trop étanches » sous EB (ex : béton revêtu)
- Détection des sections à risque, par la recherche de présence d'eau (visuel, sondage, radar, ...)
- Section instrumentée sur A75 (centre France) pour le suivi des régimes mécanique et hydrique



Fonctionnement des Interfaces

- Dans la méthode de dimensionnement, les couches bitumineuses sont supposées «parfaitement » collées entre elles → continuité des déformations tangentielles dans les matériaux de part et d'autre
- Mesures récentes sur le manège de fatigue routier de Nantes → fonctionnement plus complexe
(stage ENTPE, thèse Université deLaval/IFSTTAR)

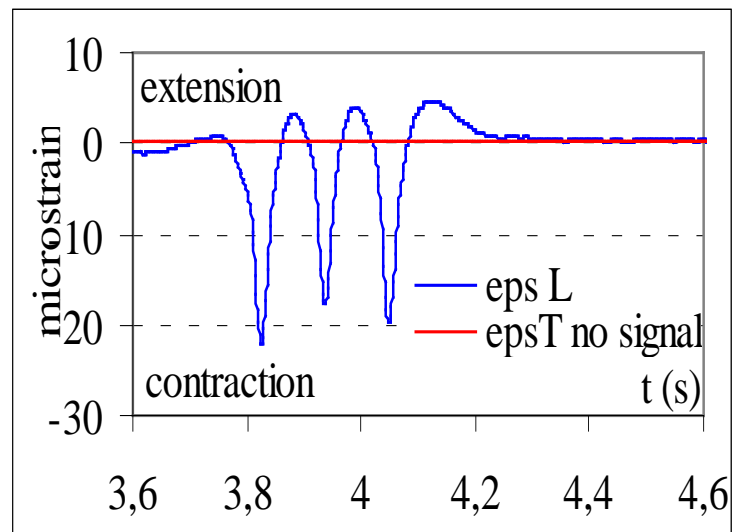
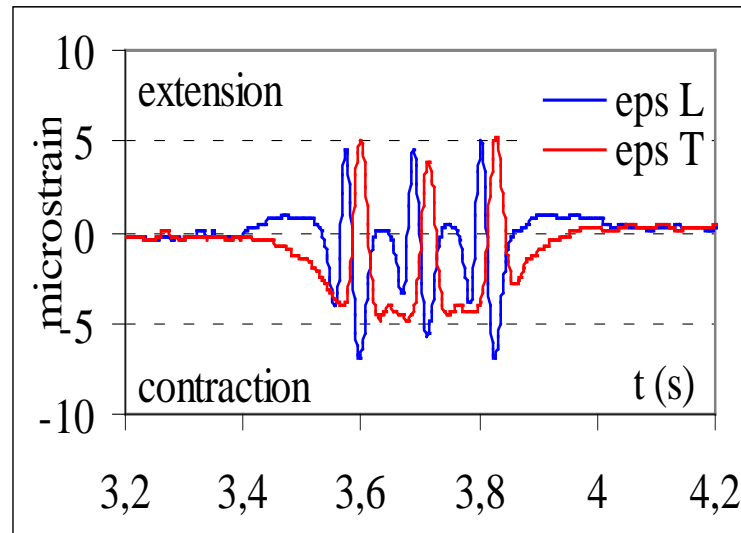
Structure instrumentée sur le manège de fatigue IFSTTAR



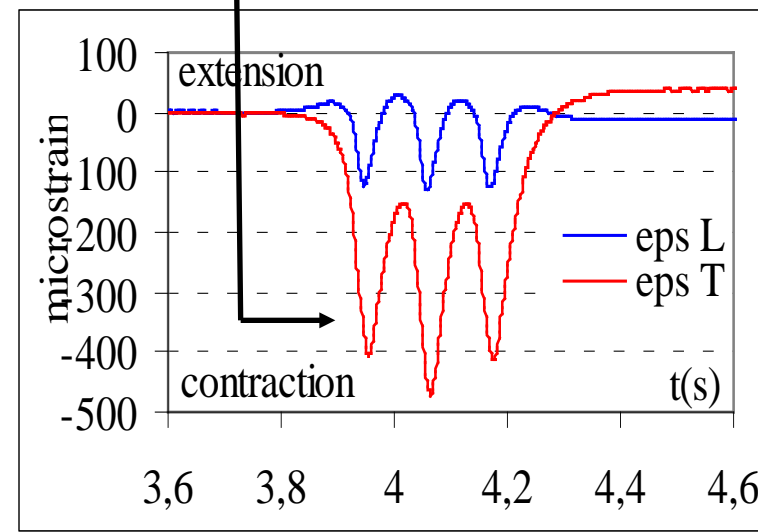
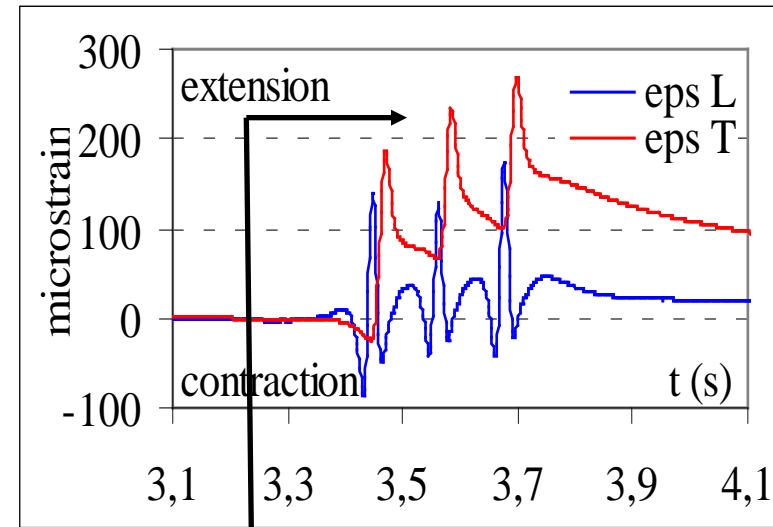
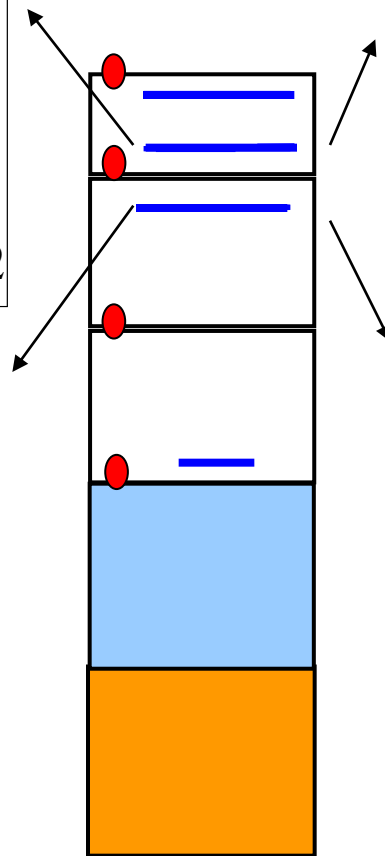
- Couches d'accrochage BB/GB et GB/GB
 - bonne qualité, répandeuse, émulsion 300g/bitume pur résiduel
 - mesures présentées > 1 an, 150 000 passages



Déformations mesurées de part et d'autre de l'interface BB/GB à 2 températures



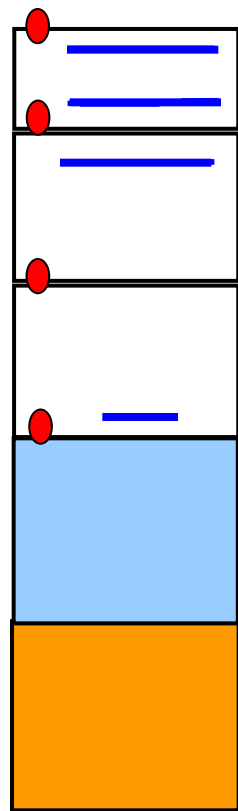
θ interface $\sim 22^\circ\text{C}$



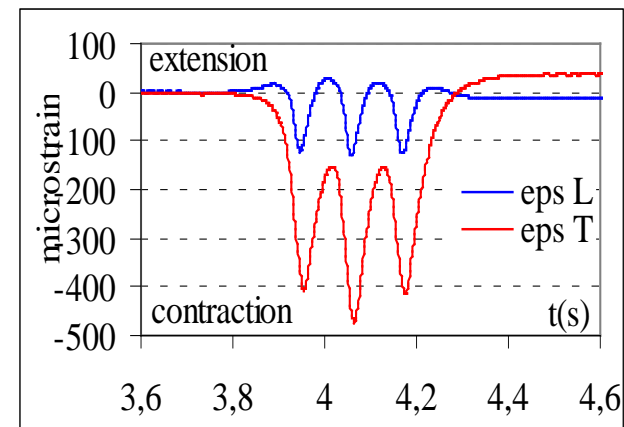
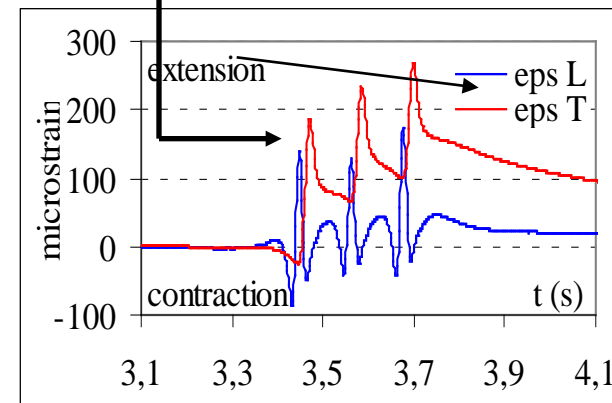
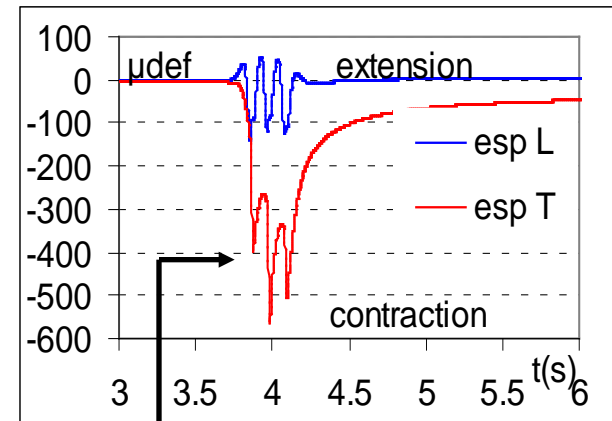
θ Interface $\sim 42^\circ\text{C}$



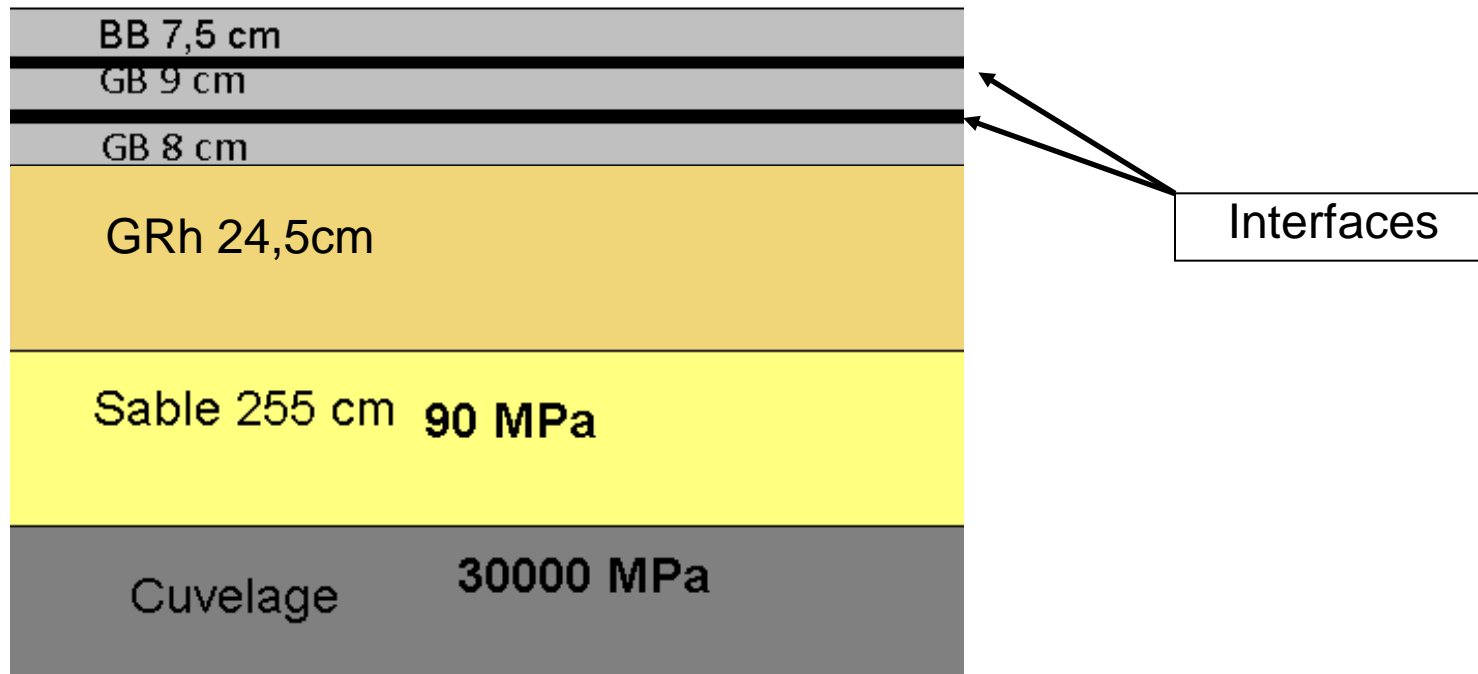
Déformations mesurées aux 3 niveaux à température élevée



θ Interface $\sim 42^{\circ}\text{C}$



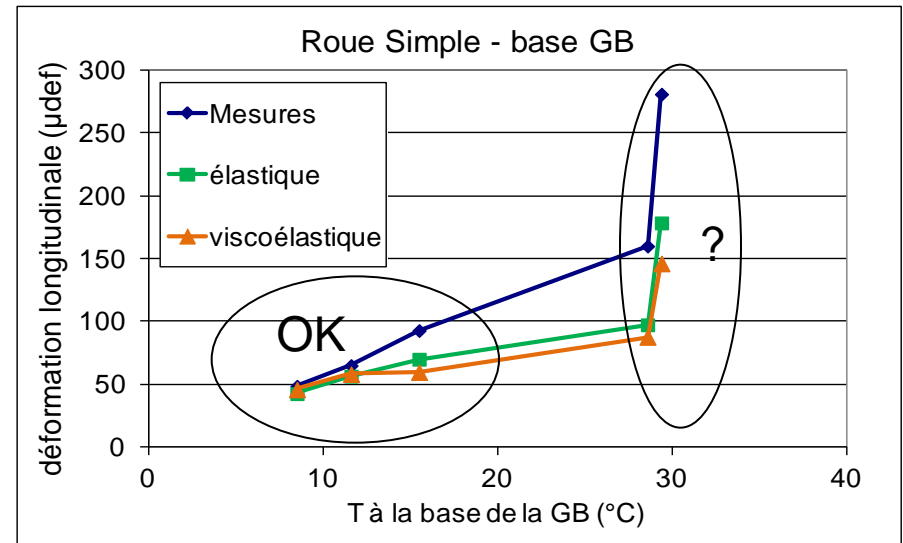
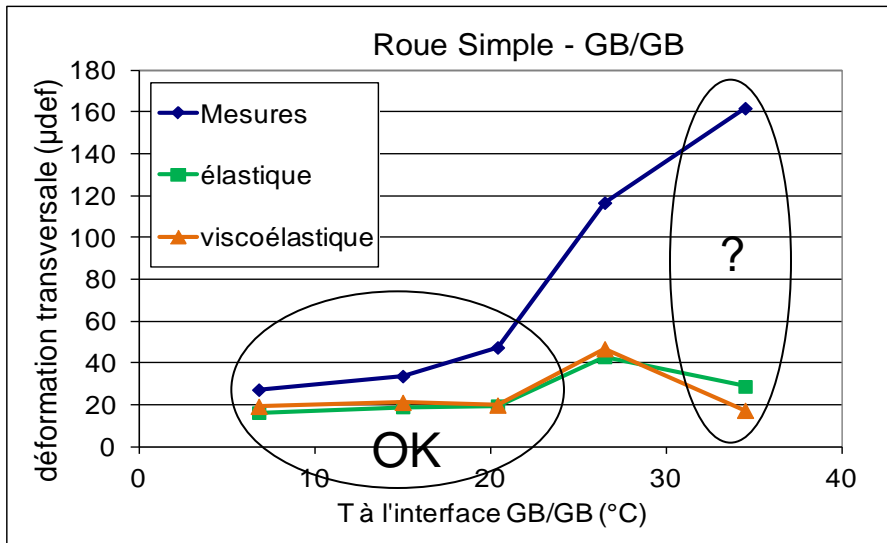
Modélisation élastique-linéaire et viscoélastique (Viscoroute) : interfaces collées ou glissantes



- Paramètres matériaux :
 - EB → essais labo (module complexe)
 - Sable + GRH : essais de plaque + déflexion

Modélisation : Déformations maximales en fonction de la température

■ Interfaces collées

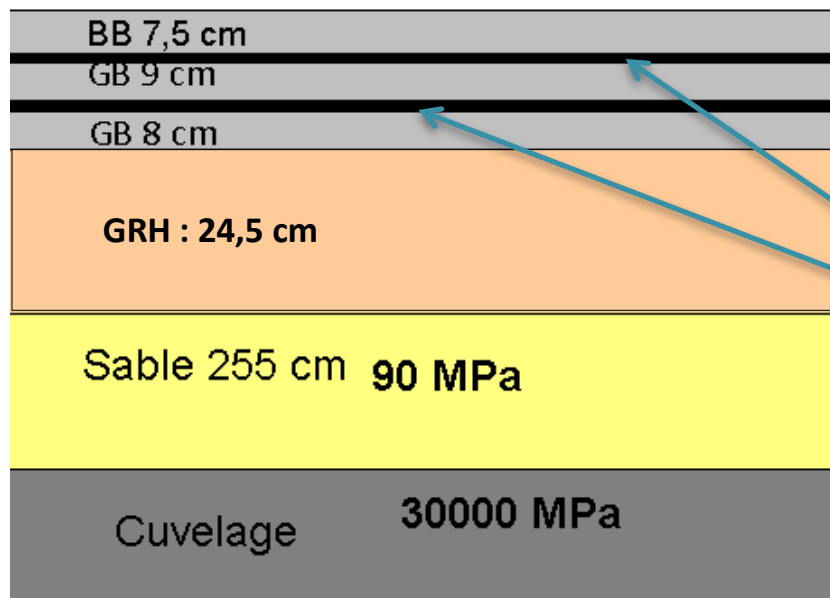


Interface collé (au sens du dimensionnement usuel)

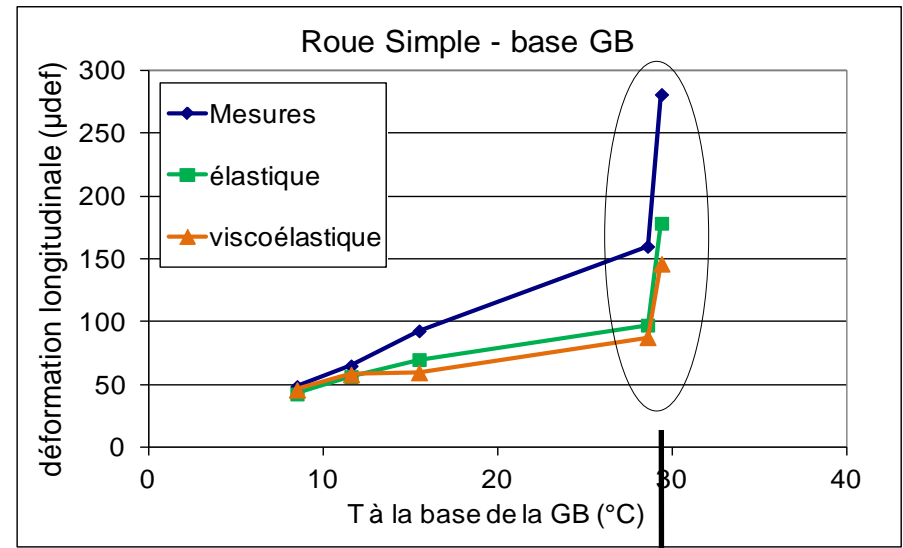
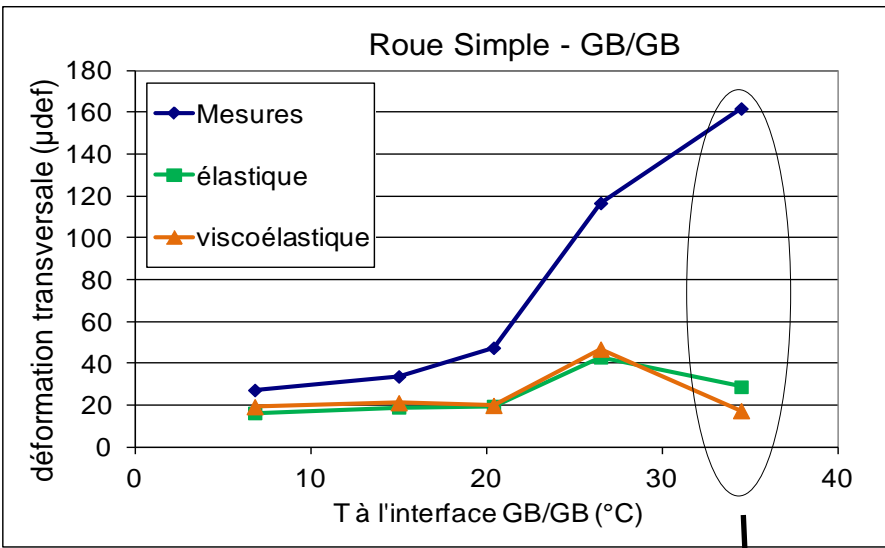
■ Interfaces glissantes trop «défavorables »

Modélisation avec couches intercalaires de faible épaisseur

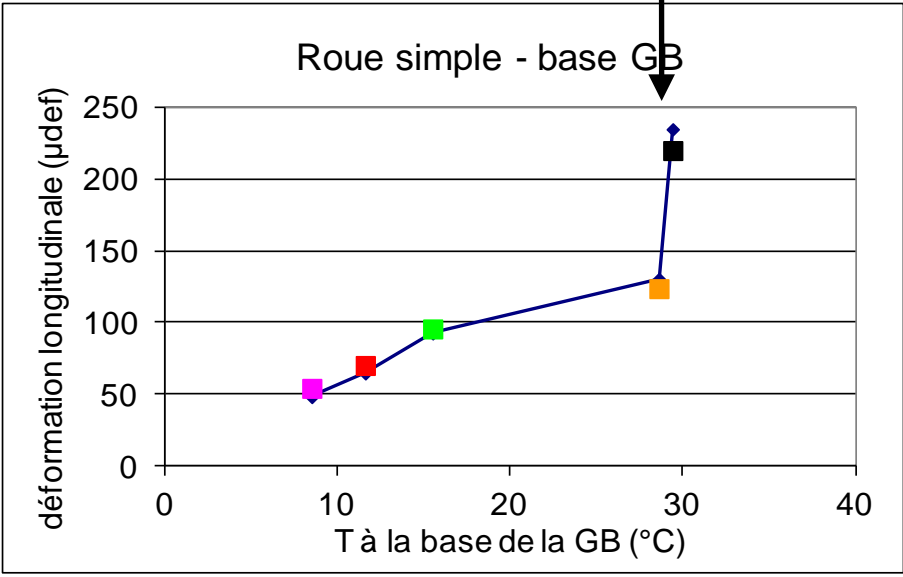
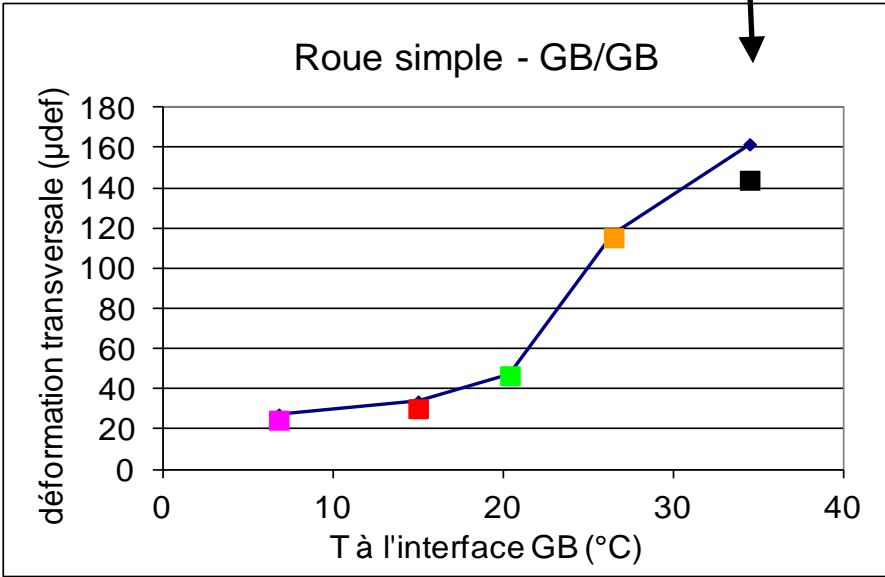
- Interface = couche mince de module variable (Alizé et ViscoRoute)
- Epaisseur arbitraire (2mm), fixée en fonction de critère de précision numérique



Matériau intercalaire
: 2 mm, $E = f(\theta)$

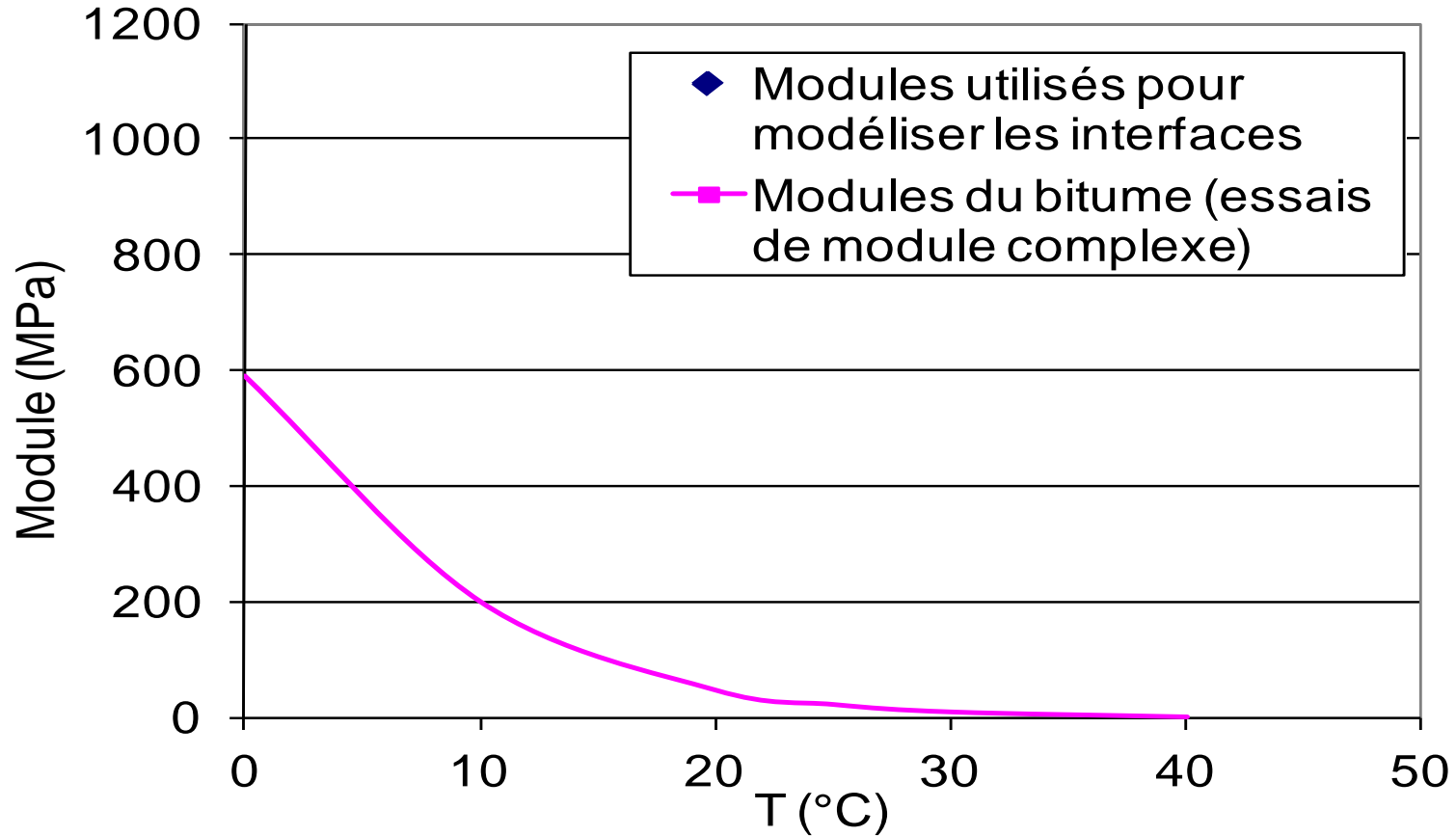


Interface collé

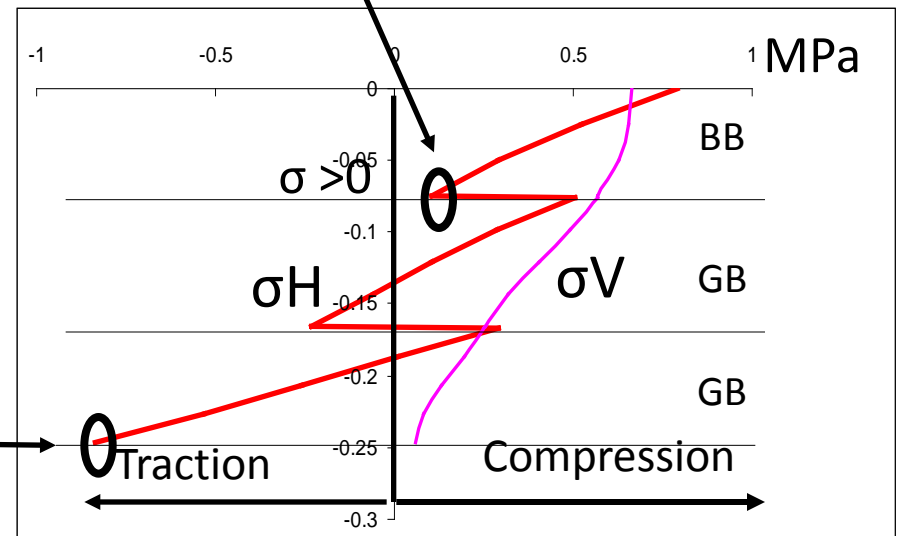
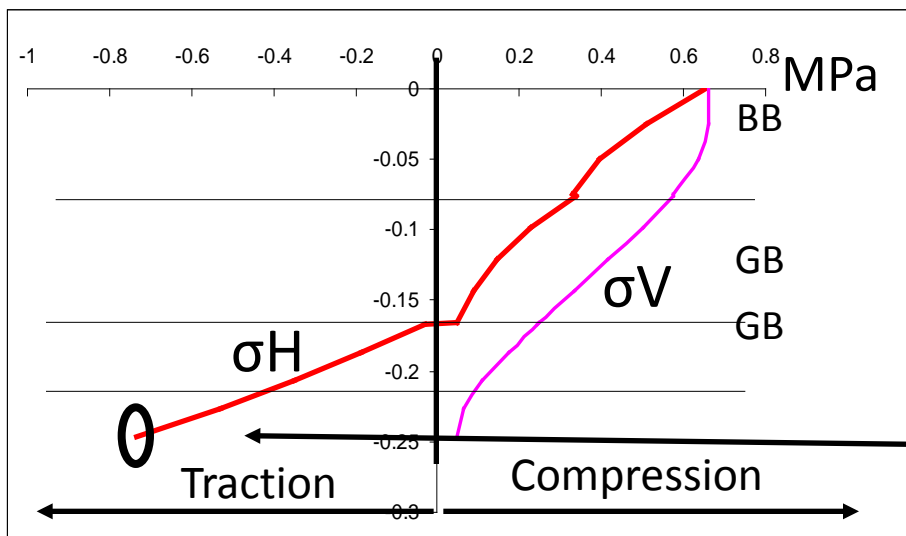
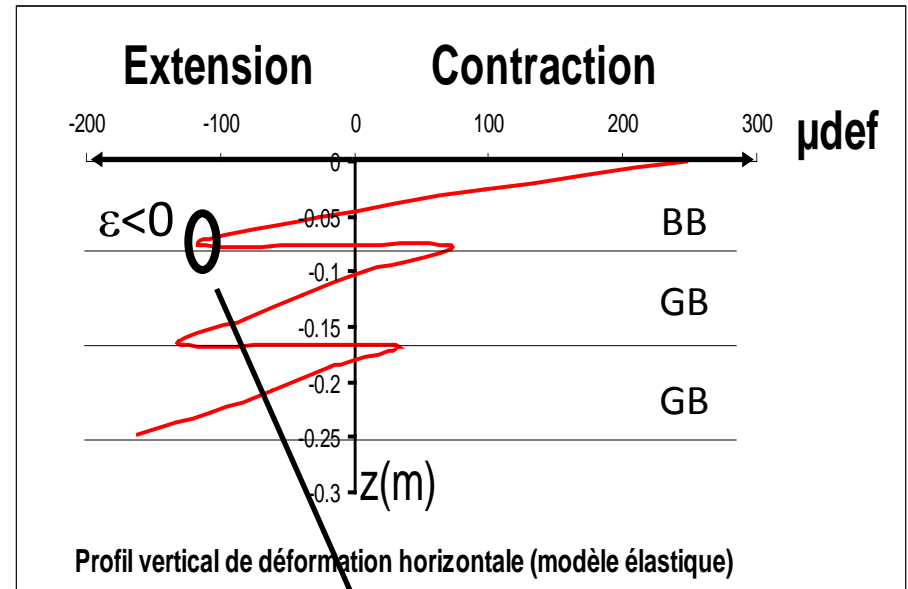
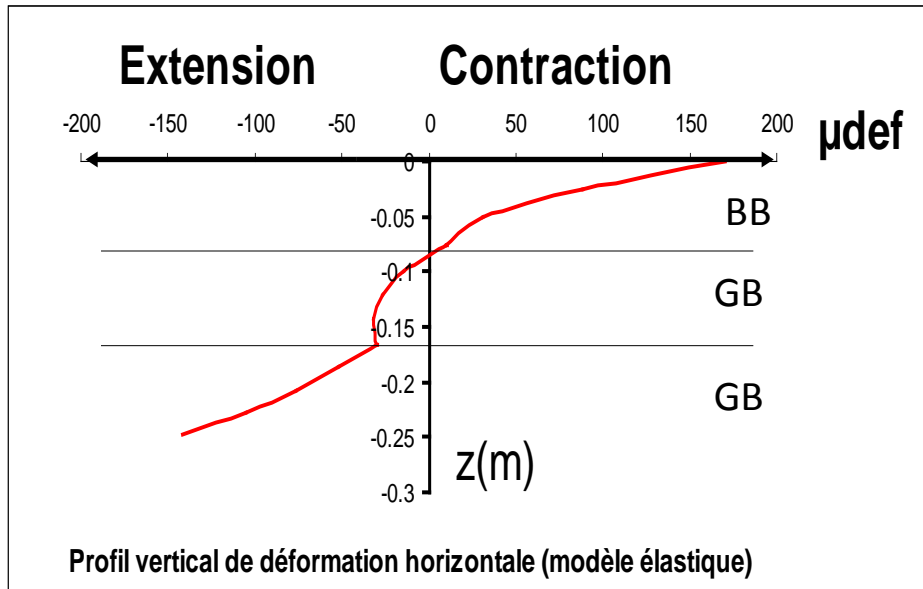


Avec interfaces de 2mm et modules ad'hoc

Module de la couche intercalaire d'interface vs module bitume et θ



Comparaison des schémas de déformation et de contrainte horizontales : collé vs intercalaires





Fonctionnement des interfaces : incidence ?

- Si observations manège généralisables (ex: A75) → fonctionnement réel des chaussées à «température élevée» différent des modèles usuels (notamment en partie haute) :
- Effets sur :
 - Fatigue des couches d'assise ?
 - Fatigue des couches de surface, fissuration par le haut
 - Action des géogrilles ?
- Mais : dimensionnement actuel calé pour l'hypothèse collée (chaussées bitumineuses)
- Auscultation : vérification de la qualité des couches d'accrochage
 - Extraction de carottes « collées » : condition nécessaire, mais est-elle suffisante ?
 - Pertinence des tests d'interface par arrachement ?
 - Ovalisation préférable ?
 - Flash ou Fwd ... + calcul inverse ?